

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROTECHNIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Planární transformátory

Originální zadání BP

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou planárních transformátorů. Práce popisuje z konstrukčního hlediska co je to planární transformátor. Dále se zabývá jeho účelem a rozdělením. Jeho uplatnění a použití v praxi, dále pak také základní charakteristické vlastnosti planárních transformátorů. A v neposlední řadě výhody a nevýhody planárních transformátorů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Planární transformátor, vícevrstvé desky plošných spojů, primární vinutí, sekundární vinutí, parazitní jevy.

ABSTRACT

This Bachelor's work deals with the problem about planar transformers. Work describes the design point of view and what a planar transformer exactly is. It also deals with function and about his distribution. His application and using in industries, then also the basic properties of planar transformers and finally, the advantages and disadvantages of planar transformers.

KEY WORDS

Planar transformer, multilayer printed circuit boards, primary winding, secondary windings, parasitic effect.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 3.6.2014

Stanislav Vokrouhlík

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Zíkovi za cenné profesionální rady při zpracovávání daného tématu, a za odborné a metodické vedení této práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za trvalou podporu při studiu na této škole.

OBSAH

1	ÚVOD	9
1.1	CÍL PRÁCE.....	9
2	PLANÁRNÍ TECHNOLOGIE	10
2.1	CÍVKA	10
2.2	KONDENZÁTOR.....	11
2.3	TRANSFORMÁTOR.....	12
3	DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	13
3.1	JEDNOVOVRSTVÉ DESKY	13
3.2	DVOUVRSTVÉ DESKY	14
3.3	VÍCEVRSTVÉ DESKY	14
4	PLANÁRNÍ TRANSFORMÁTOR.....	15
4.1	KONSTRUKCE	15
4.1.1	MATERIÁL.....	17
4.1.2	VÝROBA	17
4.2	ROZLOŽENÍ	18
4.2.1	SPOJENÍ POMOCÍ PINŮ	18
4.2.2	SPOJENÍ PŘES PROKOVENÉ OTVORY	19
4.2.3	INTEGROVANÝ PŘÍMO V DPS.....	19
4.3	VLASTNOSTI.....	20
4.4	USPOŘÁDÁNÍ VINUTÍ.....	21
4.4.1	NEPROLOKLÁDANÉ STRUKTURY	21
4.4.2	POLO-PROKLÁDANÉ STRUKTURY	22
4.4.3	PROLOŽENÉ STRUKTURY	22
4.4.4	Dvojitě prokládané sekundární vinutí.....	24

4.5	PARAZIRNÍ JEVY	25
4.5.1	PARAZITNÍ KAPACITA	25
4.5.2	ROZPTYLOVÁ IDUKČNOST	26
4.5.3	VÝPOČET PARAZITNÍ KAPACITY	26
4.5.4	VÝPOČET ROZPTYLOVÉ INDUKČNOSTI	29
4.6	VLASTNOSTI PLANÁRNÍCH TRANSFORMÁTORŮ	33
4.6.1	VÝHODY vs. NEVÝHODY	33
4.7	PROUŽITÍ V PRAXI	34
5	ZÁVĚR	35
6	SEZNAM SYMBOLŮ	36
7	SEZNAM OBRÁZKŮ	37
8	SEZNAM ROVNIC	38
9	POUŽITÉ OBRÁZKY	39
10	POUŽITÁ LITERATURA	41

1 ÚVOD

1.1 CÍL PRÁCE

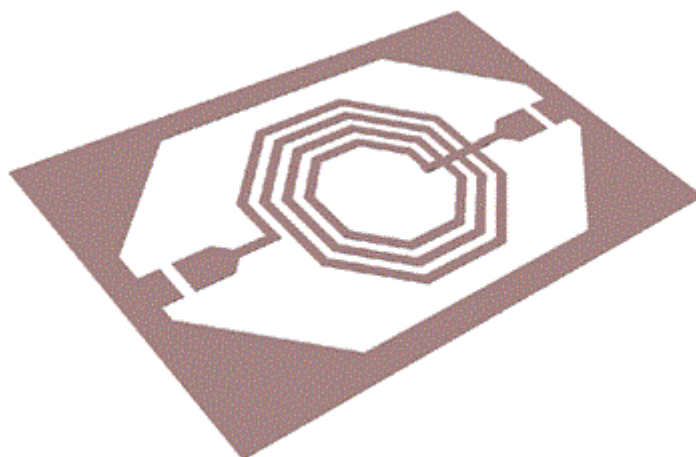
Cílem této bakalářské práce na téma planární transformátory je teoretické pochopení funkce a výroby jednotlivých součástí s touto problematikou spojovaných. A to od rozdělení a seznámení se s deskami pošlých spojů, které jsou základní součástí všech elektrotechnických prvků. V našem případě se zaměříme na vícevrstvé desky plošných spojů od výroby k jejich základnímu použití, které se zásadně projevuje v planárních transformátorech. A tím se dostáváme k jádru celé bakalářské práce, kde se snažíme teoreticky popsat a pochopit jejich funkci a proč jsou planární transformátory lepší či horší než normální. Také se zmíníme o jejich výrobě, rozdělení a v neposlední řadě použití v praxi. Dále popisujeme, jaké problémy sebou nese zmenšování planárních transformátoru a přitom zachování jejich ideálních vlastností. Čímž se myslí zmenšení parazitní kapacity a zmenšení rozptylové indukčnosti. Také se budeme zabývat otázkou uspořádání struktur vinutí a jejich následný vliv na parazitní jevy. Ukážeme si odvození výpočtu parazitních jevů a to jak pro rozptylovou indukčnost, tak i pro parazitní kapacitu.

2 PLANÁRNÍ TECHNOLOGIE

Planární technologie je zajímavou alternativou pro výrobu různých typů součástek. Je to způsob, kde se využívají vodivých cest na desce plošného spoje. A tím také zmenšování součástek, což pak vede ke zmenšení celkové velikosti součástky a to vede ke zmenšení celého výrobku.

2.1 CÍVKA

Cívku lze celkem jednoduše vyrobit jako spirálu s vodivých cest na desce plošného spoje. Je to zajímavá metoda, ale není moc praktická z důvodu, že zabírá místo na desce plošného spoje. V dnešní době se používá metoda, která využívá více vrstev desky plošného spoje, kde je několik závitů v jiné vrstvě. Tyto závity jsou pak spojeny pokovenými otvory. Vytvoření cívky s určitou indukčností závisí na permeabilitě materiálu z čeho, je tvořena deska plošného spoje, na průřezu vodiče a na počtu závitů. [1][2][6]

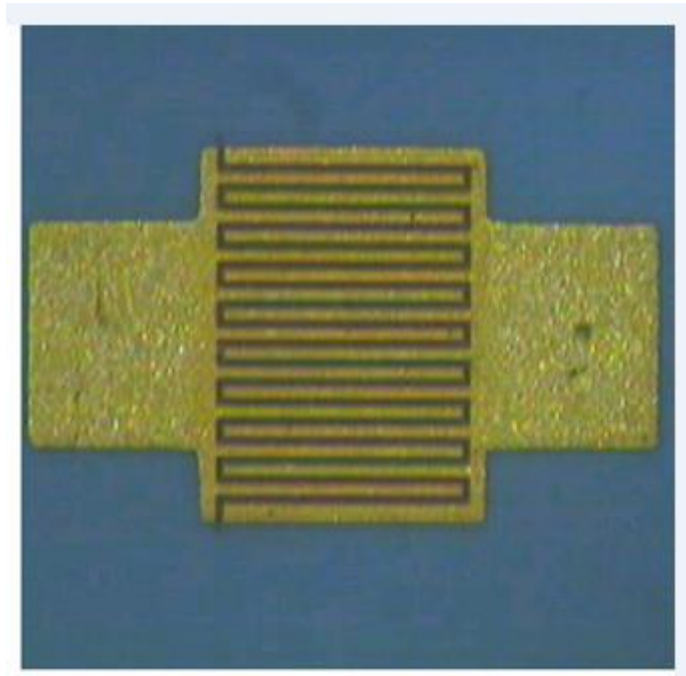


Obr. 2.1 planární cívka

2.2 KONDENZÁTOR

Kondenzátory tvořené na deskách plošných spojů se moc nepoužívají, z důvodu, že zabírají více místa než obyčejný kondenzátor. Kondenzátory vyrábějí tak aby společná plocha obou kontaktů byla co největší, z důvodu větší kapacity. Proto se kondenzátory v deskách plošných spojů vyrábějí tak, že vypadají jako by se propletly dva hřebeny. Kapacita kondenzátorů je dána permitivitou desky plošného spoje a společnou plochou elektrod.

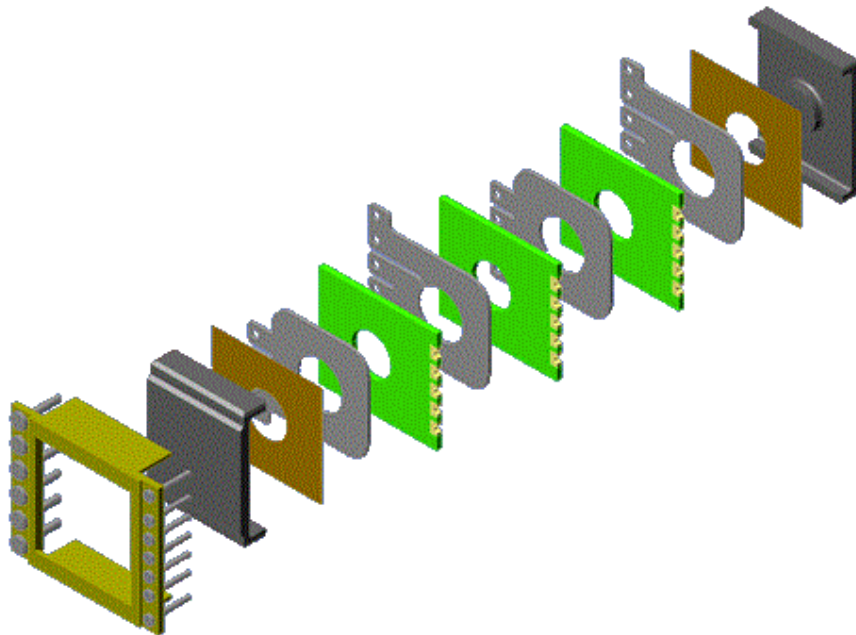
[1][2][6]



Obr. 2.2 planární kondenzátor

2.3 TRANSFORMÁTOR

Plošné transformátory neboli planární transformátory, jsou konstruovány ve více vrstvách desky plošného spoje. Každá vrstva pak obsahuje jednu sadu závitů primární a sekundární cívky. Tyto vrstvy jsou pak odděleny izolačním materiálem známým jako polyimide o tloušťce 50um jehož elektrická pevnost dosahuje 3kV. Samotné primární vinutí a sekundární vinutí bez feritového jádra se téměř nepoužívají, z důvodu špatných elektromagnetických vlastností. Proto se musí k hotové desce přidat feritové jádro. A od toho se také odvíjí vlastnosti transformátoru, které závisí na vlastnostech feritového jádra, počtu závitů primárního a sekundárního vinutí a průřezu jednotlivých vrstev. [1][2][6]



Obr. 2.3 rozložený planární transformátor

3 DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

Základním stavebním prvkem všech elektrotechnických a elektrických zařízení je deska plošného spoje. Desky plošných spojů jsou mechanickými nosiči elektronických součástek a komponentů a zároveň zajišťují jejich elektrické propojení. Základním materiálem pro výrobu desky plošných spojů je fenolpapír, fenolplast nebo sklotextil a epoxidová nebo fenolová pryskyřice. Tloušťka laminátové desky je běžně 1,5 mm. Vodivé vrstvy pak mají tloušťku v rozmezí 18-35 μm v závislosti na potřebě dodávaného výkonu a zvolené technologii výroby. Desky plošných spojů se vyrábějí ve třech variantách. Jednovrstvé desky plošných spojů (pokovené pouze z jedné strany desky), dvouvrstvé desky plošných spojů (pokovené z obou stran desky) a třívrstvé, čtyřvrstvé i šestivrstvé desky plošných spojů při zachování celkové tloušťky 1,5mm. [3][4][5][9]

3.1 JEDNOVVRSTVÉ DESKY

Jednovrstvé desky jsou první pokusy o mechanické spojování elektrických součástek pomocí laminátové desky. Tento způsob byl efektivní náhradou za spojování pomocí vodivých matic a šroubů. Jednovrstvé desky však nevydrželi příliš dlouho, protože zabíraly příliš mnoho místa, proto byly nahrazeny dvouvrstvými deskami, které využívali plochu obou stran desky. Dosud to je nejjednodušší způsob spojení elektrických součástek pomocí desky plošných spojů. Jednovrstvé desky se nadále používají i dnes, pouze tam kde není třeba složitější a dražší technika vodivého spojení elektrických součástek. [3][4][5][7]

Jedná se vlastně o laminátovou desku z jedné strany potaženou tenkou měděnou folií. Na tuto tenkou vodivou měděnou vrstvu se nanese nepájivá maska (vodivé cesty), která zachová vodivé cesty této metodě se subtraktivní. Výroba desek plošných spojů se nechá provádět různými technikami subtraktivní technika, aditivní technika, sítotisk, fototechnika. [3][4][5][7]

3.2 DVOUVRSTVÉ DESKY

Dvouvrstvé desky plošných spojů jsou náhradou jednovrstvých desek, jak tomu však bývá i tento způsob spojování elektrických součástek byl nahrazen lepším a modernějším způsobem spojování. Důvodem náhrady bylo, že i obě strany laminátové desky nestačily na vytvoření složitějších plošných spojů, proto se přešlo na používání tzv. vícevrstevných desek plošných spojů. Kde se jednotlivé vodivé vrstvy skládají jedna na druhou. [3][4][5]

Je to laminátová deska, která má obě dvě strany potaženy tenkou měděnou fólií. Způsob výroby je stejný jako u jednovrstvé desky, jen se provádí z každé strany zvlášť. Propojení obou vrstev se provádí buď spojením propojkami, nebo častěji používaný způsob spojení pokovenými otvory (vodivý otvor spojující obě dvě strany desky). Dvouvrstvé desky plošných spojů se dnes používají na méně složité obvody, tam kde není třeba používat složitější a dražší způsob výroby. [3][4][5]

3.3 VÍCEVRSTVÉ DESKY

V některých případech dvouvrstvá deska plošných spojů také nestačí. A to tam, kde je zapotřebí velké množství vodivých cest na co nejmenším prostoru, nebo v případech, kde se snažíme navrhnout co nejmenší součástku z důvodu úspory místa. Takovéto desky označujeme vícevrstvé desky plošných spojů, označení MLB (multiplayer board). [3][4][5]

Výroba vícevrstvé desky plošných spojů se provádí tak, že na základní jednovrstvou desku se vytvoří první vrstva (tedy ta nejspodnější). Poté se přes první vrstvu položí nevodivá lepící fólie z nevytvrzených syntetických hmot, která se slinuje. Na tuto vrstvu dále přijde tenká měděná fólie (tímto se vytvoří druhá vodivá vrstva). Takto se postupuje dále podle potřeby počtu vrstev. Po slinování se vrtají prokovené otvory, které spojují jednotlivé vrstvy. Pro tento postup se používá semiaditivní metoda. [3][4][5]

4 PLANÁRNÍ TRANSFORMÁTOR

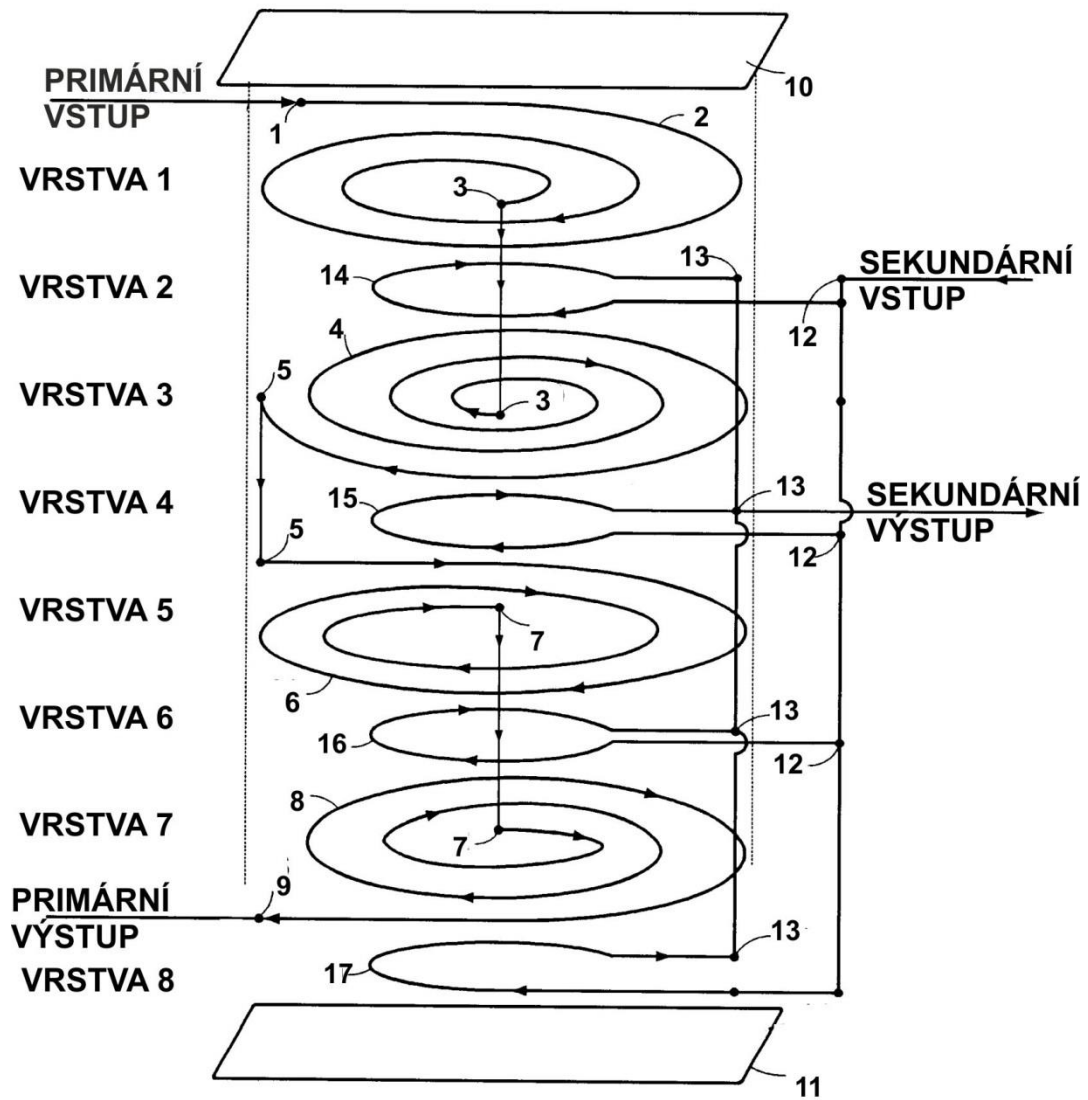
U planárních transformátorů se místo běžného drátového vinutí využívá tenkých vodivých linek na desce plošného spoje. U těchto transformátorů lze různou strukturou a uspořádáním desek plošného spoje dosáhnout různých vlastností a hodnot parazitních jevů.

4.1 KONSTRUKCE

Konstrukce planárního transformátoru se skládá ze tří základních částí. První část je primární vinutí, druhá část je sekundární vinutí. Tyto části jsou přímo integrovány ve vícevrstvé desce plošné spoje, nebo do jednotlivých desek plošných spojů, které jsou pak vodivě spojeny. Třetí část pak tvoří samotné jádro transformátoru. Toto jádro bývá většinou typu EI a z materiálu, který má velmi dobrou magnetickou vodivost (vysoká permeabilita). Jednoduchou výměnou materiálu jádra, nebo typu jádra lze dosáhnout různých vlastností planárního transformátoru pro stejné vinutí. [1][2][6]

LEGENDA:

1. Vstup primárního vinutí
2. Primární vinutí v 1 vrstvě
3. Spojení 1 a 3 vrstvy primárního vinutí
4. Primární vinutí ve 3 vrstvě
5. Spojení 3 a 5 vrstvy primárního vinutí
6. Primární vinutí v 5 vrstvě
7. Spojení 5 a 7 vrstvy primárního vinutí
8. Primární vinutí v 7 vrstvě
9. Výstup primárního vinutí
10. Horní strana desky
11. Spodní strana desky
12. Vstup sekundárního vinutí
13. Výstup sekundárního vinutí
14. Sekundární vinutí ve 2 vrstvě
15. Sekundární vinutí ve 4 vrstvě
16. Sekundární vinutí v 6 vrstvě
17. Sekundární vinutí v 8 vrstvě



Obr. 4.1 struktura planárního transformátoru

4.1.1 MATERIÁL

Materiál je velmi důležitou součástí při výrobě planárního transformátoru. Protože na různé vlastnosti potřebujeme různý materiál. Při výrobě vinutí určujeme šířku vodivé cesty podle elektrické vodivosti, hustoty elektrického proudu (jak velký proud může procházet na průřez vinutí). [1][2][6][9]

Izolační materiál musí mít dostatečně velký elektrický odpor, aby vinutí mohlo být dostatečně blízko sebe a také, aby nedošlo ke zkratu ve vinutí. Izolační materiál je epoxidový laminát a měl by mít elektrickou pevnost mezi vinutími až 3kV. [1][2][6]

- *FR1* Papír nasycený fenolovou pryskyřicí – laciný druh
- *FR2* Papír nasycený fenolovou pryskyřicí – standardní provedení
- *FR3* Papír nasycený epoxidovou pryskyřicí
- *FR4* Tkanina ze skelných vláken sycená epoxidovou pryskyřicí – nejběžnější druh
- *FR5* Tkanina ze skelných vláken sycená epoxidovou pryskyřicí – zvláště tepelně odolný druh

[7]

4.1.2 VÝROBA

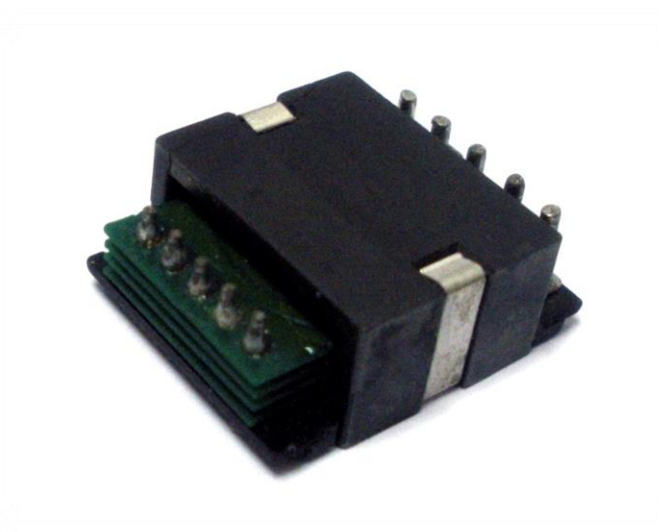
Výroba se provádí velice jednoduše. Za prvé se nechá vyrobít předem navržené vinutí. A to buď jako vinutí z více desek plošných spojů (kde každá deska obsahuje jednu vrstvu vinutí), které se pak pomocí pinů nebo prokovenými otvory spojí dohromady. Vznikne tak sekundární a primární vinutí. Za druhé k těmto spojeným deskám se pak přidá feromagnetické jádro většinou typu EI. Další metoda výroby sekundárního a primárního vinutí je taková, že se nechá vyrobít jako jeden tištěný spoj s více vrstvami, kdy každá vrstva obsahuje jeden nebo několik závitů (vinutí přímo integrované do vícevrstvé desky plošného spoje). Poté stačí přidat feromagnetické jádro a planární transformátor s integrovaným vinutím ve vícevrstvé desce plošného spoje je hotov. [1][2][3]

4.2 ROZLOŽENÍ

Planární transformátory se nechají rozdělit podle metod spojování jednotlivých vrstev, kde každá metoda má jiné výhody a zápory.

4.2.1 SPOJENÍ POMOCÍ PINŮ

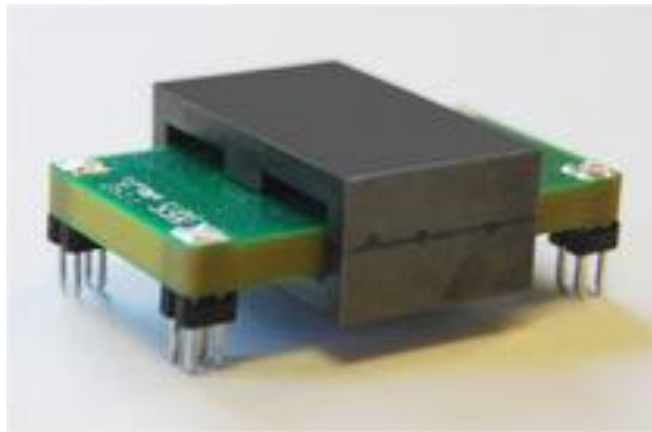
Metodou spojování pomocí pinů vznikne samostatný planární transformátor, který se poté nechá napájet na desku plošného spoje. Na předem připravené piny se nasazují jednotlivé desky vinutí, které mají na každé straně prokovené otvory. Prokovené otvory primárního a sekundárního vinutí mají rozdílný průměr. To proto, aby nedošlo k otočení primárního a sekundárního vinutí. Mezi každou deskou jsou ještě nasazovány izolační podložky, to aby nedošlo ke spojení jednotlivých vinutí jinde než v prokovených otvorech. Tyto prokovené otvory se pak spájí s vodivými piny a tím vznikne vodivé spojení všech vrstev vinutí a tak vznikne hotové primární a sekundární vinutí. Teď se planární transformátor může použít jen jako transformátor se vzduchovou mezerou bez feromagnetického jádra. Jednoduchým přidáním feromagnetického jádra se zlepšují jeho elektromagnetické vlastnosti. [1][2][6]



Obr. 4.2 desky TR spojené pomocí pinů

4.2.2 SPOJENÍ PŘES PROKOVENÉ OTVORY

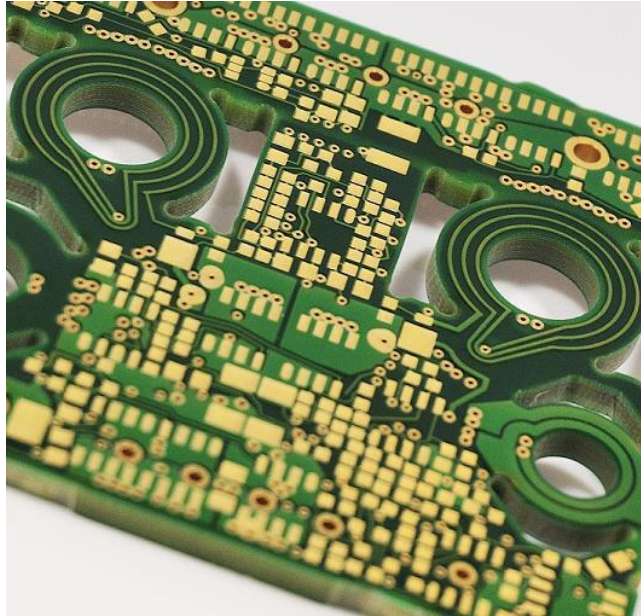
Tato metoda je obdobná metodě předešlé. Liší se v tom, že zde odpadávají piny a vodivé spojení se zde vytváří pomocí prokovených otvorů, které se vodivě spojí pájkou či pájecí pastou. Jednotlivé desky musí být dobře odizolované, protože zde jednotlivé desky vinutí přiléhají na sebe. Vodivé spojení desek vinutí se provádí pájkou, která se zahřátím na určitou teplotu vodivě spojí s prokovenými otvory všech vrstev vinutí. Přidáním feromagnetického jádra vznikne samotný planární transformátor. [1][2][6]



Obr. 4.3 vrstvy TR spojené pomocí prokovených otvorů

4.2.3 INTEGROVANÝ PŘÍMO V DPS

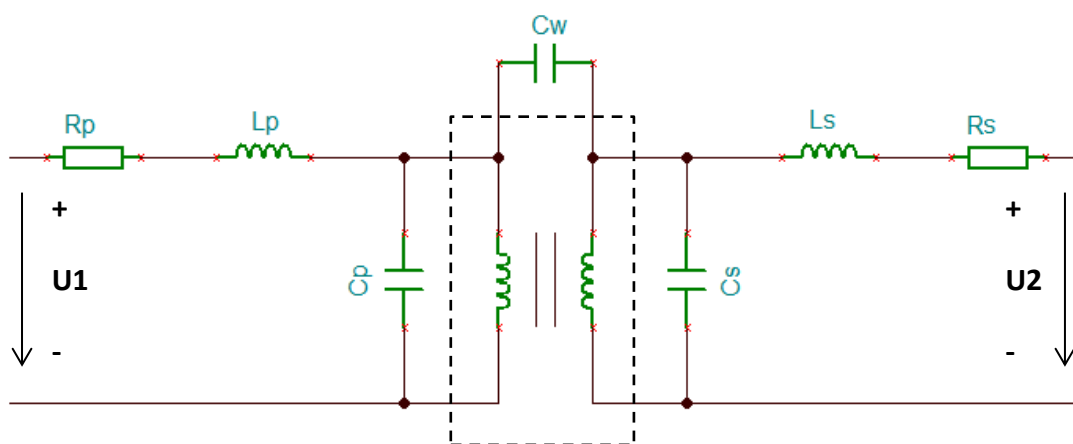
Planární vinutí integrované přímo do desky plošného spoje lze pouze u vícevrstevných desek plošných spojů. Planární transformátor se z planárního vinutí stává po přidání feromagnetického jádra. Metoda výroby vinutí a složení planárního transformátoru integrovaného přímo do desky plošného spoje je popsána viz. kapitola 3. [1][2][6]



Obr. 4.4 TR integrovaný přímo na DPS

4.3 VLASTNOSTI

Různé vlastnosti planárních transformátorů se odvíjejí od různých struktur (uspořádání primárního a sekundárního vinutí na desce plošného spoje). Tím se dostáváme k parazitní kapacitě a rozptylové indukčnosti, dvěma hlavním nežádoucím parazitním vlivům.



Obr. 4.5 Náhradní schéma planárního transformátoru

Na *obr. 4.5* je znázorněno náhradní schéma planárního transformátoru. Kde transformátor uvnitř čerchovaného obdélníku je ideální planární transformátor. Součástky mimo tento obdélník zastupují jednotlivé parazitní jevy. Základní odpory vinutí jsou znázorněny jako R_p a R_s , kde jednotlivé indexy označují typ vinutí. L_p a L_s jsou náhrady na rozptylovou indukčnost primárního a sekundárního vinutí. C_p a C_s zase představuje parazitní kapacitu primárního a sekundárního vinutí a C_w zastupuje parazitní kapacitu v izolaci mezi primárním a sekundárním vinutím. [11]

4.4 USPOŘÁDÁNÍ VINUTÍ

Zde si ukážeme jak tři různé uspořádání primárního a sekundárního vinutí mají vliv na parazitní jevy, a které uspořádání vinutí je nevhodnější pro planární transformátory. Neprokládané struktury, částečně proložené struktury a proložené struktury, kde primární strana bude mít 8 závitů a sekundární strana bude mít 4 závity.[8][9][10]

4.4.1 NEPROLOKLÁDANÉ STRUKTURY

Na *obr. 4.6* Neprokládaných struktur je vidět rozložení magnetomotorické síly v závislosti na rozložení struktur. Kde p_1 - p_8 představují primární vinutí a s_1 - s_4 představuje sekundární vinutí. Na *obr. 4.6* je vidět, že největší magnetomotorická síla je na přechodu mezi primárním a sekundárním vinutím. To znamená, že toto rozvržení struktur není zas tak vhodné, protože na přechodu mezi vinutími vznikají největší parazitní jevy.[8][9][10]



Obr. 4.6 neprokládané struktury

4.4.2 POLO-PROKLÁDANÉ STRUKTURY

Polo-proložené struktury jsou vidět na *obr. 4.7*. Zde se pravidelně střídá 4x primární vinutí s 4x sekundárním vinutím a zase 4x primární vinutí. Tímto střídáním je dosaženo dvou přechodů mezi primárním a sekundárním vinutím. To znamená menší magnetomotorickou sílu, než tomu je u *obr. 4.6* .[8][9][10]

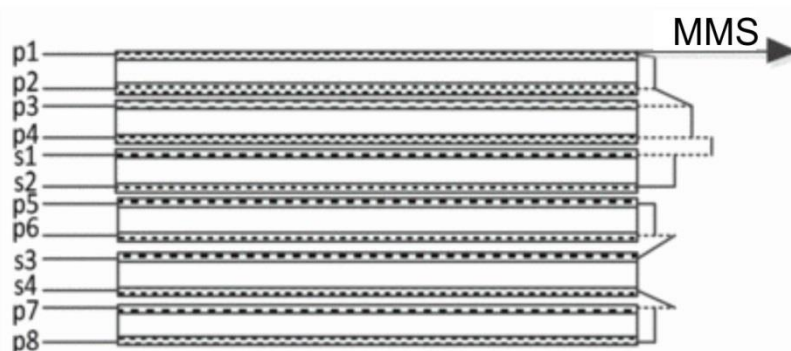


Obr. 4.7 Polo-prokládané struktury

4.4.3 PROLOŽENÉ STRUKTURY

U proložených struktur na *obr. 4.8* Je vidět ve spodní polovině menší nárůst magnetomotorické síly oproti horní polovině. Horní polovina je se svým uspořádáním vinutí stejná jako polo-prokládaná struktura. Zato spodní polovina je pravidelně prokládána, tím se

zde dosáhlo více přechodu mezi primárním a sekundárním vinutím. Z čehož plyne menší magnetomotorická síla oproti horní polovině struktury.[8][9][10]



Obr. 4.8 Prokládané struktury

V následujících tabulkách je vidět srovnání jednotlivých struktur. V tab.1 je srovnávací veličina rozptylová indukčnost. Ve výsledku je jasně patrné, že nejhůře na tom s rozptylovou indukčností je neproložená struktura a naopak nejlépe z toho vychází proložená struktura, která má přibližně sedmkrát menší rozptylovou indukčnost.

Tab. 4.1 Simulované a vypočtené hodnoty indukčnosti

Struktura	Budící indukčnost (mH)	Rozptylová indukčnost (mH)	
	Simulovaná	Simulovaná	vypočtená
Neproložená	355,967	0,875	0,808
Polo-proložená	355,967	0,201	0,192
proložená	355,967	0,116	0,115

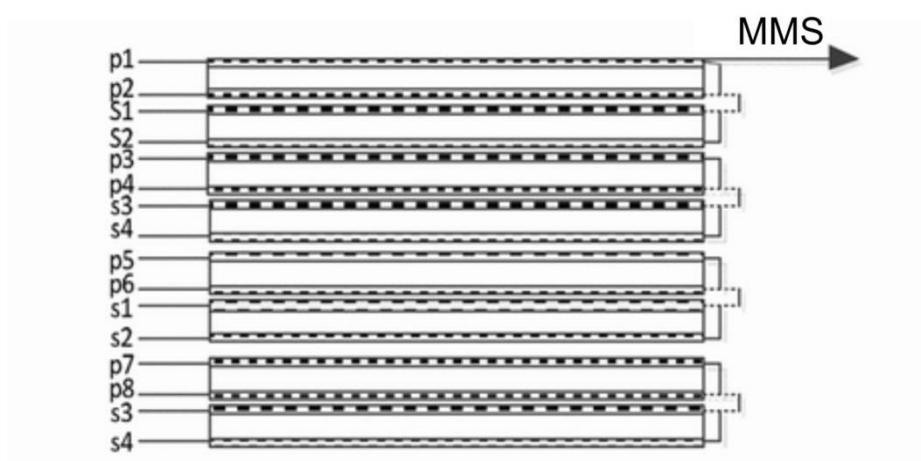
Při srovnání parazitních kapacit pro jednotlivé struktury můžeme vidět v tab. 4.2, že největší parazitní kapacitu má struktura neproložená. Je zajímavé, že nejmenší parazitní kapacitu nemá proložená struktura, ale polo-proložená struktura. Je způsobeno tím, že prokládané struktury zvětšují plochu mezi vinutími a to má za následek zvětšení parazitní kapacity.

Tab. 4.2 Simulované účinky parazitní kapacity

Struktura	Efekt parazitní kapacity (pF)	
	Vlastní kapacitní účinky	Vzájemné kapacitní účinky
Neproložená	0,928	30,907
Polo-proložená	2,235	10,257
proložená	2,046	12,420

4.4.4 Dvojitě prokládané sekundární vinutí

Tento tip struktur je velice výhodný, pokud potřebujeme zajistit co nejmenší rozptylovou indukčnost. Tím že snížíme rozptylovou indukčnost, dovolíme průchod větších proudů, a tím se nepatrně zvýší parazitní kapacita. Abychom zajistili dvojitě prokládané sekundární vinutí, musíme dodržet poměr vinutí 2:1. Na *obr. 4.8* je tato podmínka splněna. Primární vinutí obsahuje 8 vrstev a sekundární vinutí zase 4 vrstvy. Ve srovnání s ostatními strukturami z *tab. 4.3* vyplývá, že rozptylová indukčnost pro dvojitě prokládané sekundární vinutí je téměř dvakrát menší, než je tomu u prokládaného vinutí.



Obr. 4.9 Dvojitě prokládané sekundární vinutí

Tab. 4.3 Měřené hodnoty budící a rozptylové indukčnosti

Struktura	Budící indukčnost (μH)	Rozptylová indukčnost (μH)
Neproložená	350,385	1,517
Polo-proložená	349,290	1,186
proložená	347,720	0,876
Dvojitě prokládané sekundární vinutí	371,941	0,477

4.5 PARAZITNÍ JEVY

Při dosažení správných a co možná nejmenších hodnot parazitních vlivů, musíme často přistoupit ke kompromisu. Protože snížení rozptylové indukčnosti se zvětšuje parazitní kapacita a naopak. Ve většině případů se častěji soustředíme na rozptylovou indukčnost a pak na parazitní kapacitu.

4.5.1 PARAZITNÍ KAPACITA

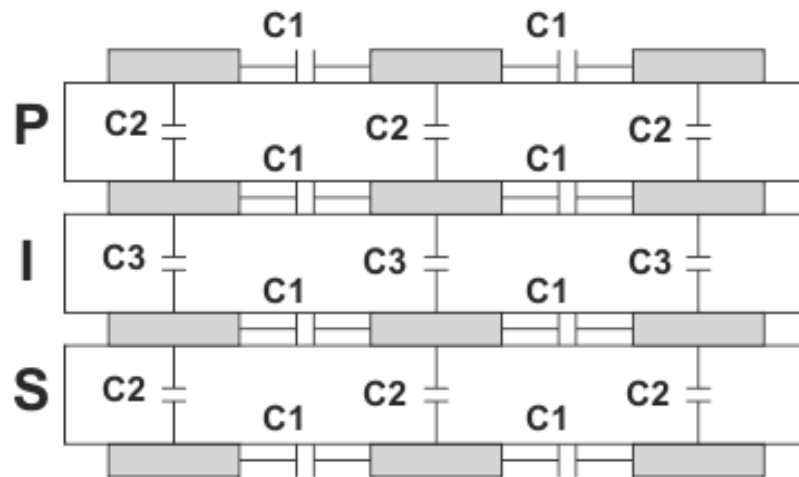
Jedná se o elektrostatický jev, který se převážně vyskytuje u kabelového vedení. Jenže, tento jev nastává i v primárním a sekundárním vinutí planárního transformátoru. Jedná se o to, že zde vznikají kapacity, které mají nežádoucí vliv na vlastnosti transformátoru. Parazitní kapacita vzniká všude tam, kde se v nepatrné blízkosti nacházejí dva vodiče s opačným nábojem. V našem případě se jedná o primární vinutí, které zastupuje kladnou elektrodu a sekundární vinutí zase zápornou elektrodu a izolace mezi vinutími tvoří dielektrikum, což pak tvoří takový nežádoucí kondenzátor. Tím jak je uspořádané primární a sekundární vinutí se mění i parazitní kapacita, protože se mění plocha mezi vinutími.[8][9][10]

4.5.2 ROZPTYLOVÁ IDUKČNOST

Rozptylová indukčnost je elektromagnetické pole, které se uzavírá mimo magnetický obvod cívky a tím při přenosu na sekundární vinutí dochází ke ztrátám. Při tomto jevu způsobuje uložená energie rozptylové indukčnosti napěťové špičky v hlavním vypínači a opět dochází k nežádoucím ztrátám. Tento jev můžeme eliminovat změnou uspořádání a šířkou izolační vrstvy primárního a sekundárního vinutí. Tak, že zmenšíme vzdálenost mezi primárním a sekundárním vinutím, zajistíme lepší přenos elektromagnetické energie, což má za následek zmenšení rozptylové indukčnosti. Tím, že jsme zmenšili šířku mezi primárním a sekundárním vinutím se vlastně zvětšila parazitní kapacita. Další možností jak zmenšit rozptylovou indukčnost je použitím tenčí měděné fólie. Touto metodou jsme dosáhli menší rozptylové indukčnosti na úkor zmenšení proudu, který můžeme přenést planárním transformátorem. [8][9][10]

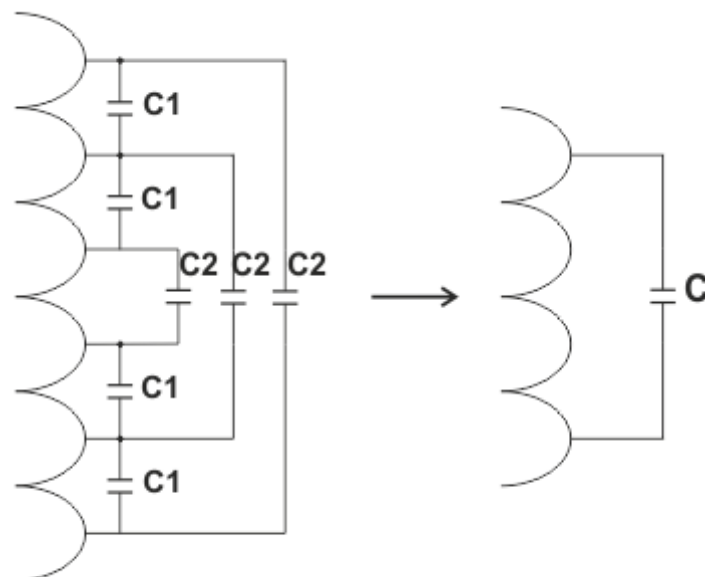
4.5.3 VÝPOČET PARAZITNÍ KAPACITY

V následujícím odstavci si odvodíme vzorec pro výpočet parazitní kapacity, která vzniká mezi jednotlivými vrstvami vinutím a také mezi každým závitem vinutí jak je vidět na *obr. 4.10*. Mezi každými dvěma vodivými cestami vzniká kapacita C_1 , jak je patrné z *obr. 4.10*. To samé platí pro kapacita C_2 , které vznikají v primárních a sekundárních stranách vinutí. Indukčnosti C_3 v izolaci mezi primárním a sekundárním vinutím jsou zase jiné.



Obr. 4.10 parazitní kapacity v transformátoru

Pro zjednodušení představy a výpočtu celkové kapacity uvnitř vinutí jsou kondenzátory znázorněny jako jeden ekvivalentní kondenzátor C na obr. 4.11



Obr. 4.11 ekvivalentní obvod parazitních kapacit

Z obr 4.11 jsme vypočetli celkovou kapacitu, která je vidět níže.

$$C = \frac{8C_1C_2^2 + 3C_1^3C_2 + 4C_2^3}{C_1^2 + 4C_2^2 + 6C_1C_2} = \frac{8C_1 + 3C_1\frac{C_1}{C_2} + 4C_2}{\frac{C_1^2}{C_2^2} + 4 + 6C_1\frac{C_1}{C_2}}$$

rov. 4.1

V dalším postupu budeme vycházet ze základní rovnice pro výpočet kapacity kondenzátoru znázorněné v rov. 4.2 kde d představuje vzdálenost mezi vinutími a S je plocha vodivé cesty.

$$C = \frac{\epsilon S}{d}$$

rov. 4.2

V našem případě rozepíšeme kapacitu C_1 jak je vidět v rov. 4.3. Kde plocha S je tvořena délkou vnější cesty l_m a výškou vodivé cesty H (běžně se pohybuje kolem $35\mu\text{m}$), šířka mezi jednotlivými závity je značena W_d .

$$C_1 = \frac{\epsilon H l_m}{W_d}$$

rov. 4.3

Kapacitu C_2 rozepíšeme podobným způsobem. Zde W_c je šířka vodivé cesty. Změnila se i vzdálenost mezi plochami, nyní představuje tloušťku desky plošného spoje, kde je značena jako W_t .

$$C_2 = \frac{\epsilon W_c l_m}{W_t}$$

rov. 4.4

Je-li splněna podmínka $H \ll W_c$ pak platí, že kondenzátor C_1 je mnohonásobně menší než C_2 ($C_1 \ll C_2$) a z toho tedy plyne, že celková parazitní kapacita primárního a sekundárního vinutí je přibližně stejná jako kapacita C_2 ($C \approx C_2$). Dále můžeme vypočítat z rov. 4.5 parazitní kapacitu izolace mezi primárním a sekundárním vinutím.

$$C = 3C_3 = \frac{\varepsilon W_c l_w}{W_t}$$

rov. 4.5

4.5.4 VÝPOČET ROZPTYLOVÉ INDUKČNOSTI

V následujících řádcích si ukážeme odvození pro výpočet rozptylové indukčnosti. Toto odvození provedeme pro neprokládané struktury vinutí, které jsou vidět na *obr.4.6*. Pro *obr.4.6* se dá po zanedbání vnitřních struktur vypočítat rozptylová indukčnost z *rov. 4*, kde h_1 je tloušťka primárního vinutí desky plošného spoje h_2 tloušťka sekundárního vinutí a h_Δ je vzdálenost izolace mezi primárním a sekundárním vinutím. Šířku vinutí popisuje b_w .

$$L_1 = \mu_0 N^2 \frac{l_w}{b_w} \left(\frac{h_1 + h_2}{3} + h_\Delta \right)$$

rov. 4.6

Struktura uvnitř vinutí je pro přesný výpočet rozptylové indukčnosti velmi důležitá. Na primární straně vinutí může být intenzita magnetického pole (na *obr.4.6* značena jako MMS) popsána rovnicí *rov. 4.7*. Kde h_1 a h_Δ popisují totéž, co v předešlém výpočtu, ale h_2 teď popisuje vzdálenost mezi vrstvami primárního vinutí. Počet primárního vinutí je značen P .

$$H(x) = \begin{cases} PH_p + \frac{x - P(h_1 + h_2)}{h_1} H_p & P(h_1 + h_2) < x < P(h_1 + h_2) + h_1 \\ (p + 1)H_p & P(h_1 + h_2) + h_1 < x < (P + 1)(h_1 + h_2) \end{cases}$$

rov. 4.7

Magnetická intenzita H_p v jedné vrstvě primárního vinutí je popsána *rov. 4.8* kde I_p představuje procházející proud primární stranou a n_p je číslo primárního vinutí.

$$H_p = H(h_1) = \frac{I_p n_p}{b_w}$$

rov. 4.8

Pro sekundární stranu je rov. 4.9 hodně podobná, s těmi rozdíly, že I_s je proud sekundárního vinutí a n_s je číslo sekundárního vinutí.

$$H_s = H(h_2) = \frac{I_s n_s}{b_w}$$

rov. 4.9

Pak celková intenzita magnetického pole primární a sekundární strany je popsána rov. 4.10 kde m_p je počet sekcí primární strany (rozhraní mezi vinutím).

$$H(x) = \begin{cases} m_p H_p - S H_s - \frac{[x - m_p(h_1 + h_2) - h_\Delta - S(h_1 + h_2)]}{h_1} H_s & m_p(h_1 + h_2) + h_\Delta + S(h_1 + h_2) < x < m_p(h_1 + h_2) + h_\Delta + S(h_1 + h_2) + h_1 \\ h(x) = m_p H_p - (S + 1) H_s & m_p(h_1 + h_2) + h_\Delta + S(h_1 + h_2) < x < m_p(h_1 + h_2) + h_\Delta + S(h_1 + h_2)(h_1 + h_2) \end{cases}$$

rov. 4.10

Intenzita magnetického pole, která je uložena ve vinutí planárního transformátoru se dá jednoduše popsat základní rov. 4.11

$$W = \frac{\mu_0}{2} \int H^2 dV$$

rov. 4.11

Po jednoduchém dosazení do rov. 4.11 a následné úpravě dostaneme rov. 4.12, která popisuje vzniklou energii rozptylového magnetického pole primárního vinutí.

$$W_p = \frac{\mu_0 b_w l_w}{2} \int_0^{m_p(h_1+h_2)} H^2(x) dx = \frac{\mu_0 l_w I_p^2 n_p^2}{12 b_w} [2h_1 m_p^3 + h_2 m_p (m_p + 1)(2m_p + 1)]$$

rov. 4.12

Základní rovnice pro výpočet energie cívky je popsána níže.

$$W = \frac{1}{2} L I^2$$

rov. 4.13

Po dosažení rov. 4.12 do rov. 4.13 a následné úpravě dostaneme rovnici pro rozptylovou indukčnost primárního vinutí rov. 4.14

$$L_p = \frac{2W_p}{I_p^2} = \frac{\mu_0 l_w n_p^2}{6b_w} [2h_1 m_p^2 + h_2 m_p (m_p + 1)(2m_p + 1)]$$

rov. 4.14

Rovnice pro energii v sekundární straně vinutí je hodně podobná rov. 4.12. Liší se zde pouze indexy, které teď představují sekundární stranu vinutí a ne primární. Opět po dosažení do rovnice energie cívky dostaneme rozptylovou indukčnost sekundární strany vinutí rov.4.16

$$W_s = \frac{\mu_0 b_w l_w}{2} \int_0^{m_s(h_1+h_2)} H^2(x) dx = \frac{\mu_0 l_w I_s^2 n_s^2}{12b_w} [2h_1 m_s^3 + h_2 m_s (m_s + 1)(2m_s + 1)]$$

rov. 4.15

$$L_s = \frac{2W_s}{I_s^2} = \frac{\mu_0 l_w n_s^2}{6b_w} [2h_1 m_s^2 + h_2 m_s (m_s + 1)(2m_s + 1)]$$

rov. 4.16

Energie uložená v izolaci mezi primární stranou a sekundární stranou vinutí se dá vypočítat z rov. 4.17

$$W_\Delta = \frac{\mu_0 b_w l_w}{2} \int_{m_p(h_1+h_2)}^{m_p(h_1+h_2)+h_\Delta} m_p^2 H_p^2 dx = \frac{\mu_0 l_w I_p^2 n_p^2 m_p^2 h_\Delta}{2b_w}$$

rov. 4.17

Po sečtení energie primární, sekundární strany a energie v izolaci mezi primární a sekundární stranou vinutí a následném dosažení do rovnice energie cívky rov. 4.13 dostaneme rovnici pro celkovou rozptylovou indukčnost planárního transformátoru rov. 4.18.

$$\begin{aligned}
L_k &= \frac{2(W_p + W_s + W_\Delta)}{I_p^2} \\
&= \frac{\mu_0 l_w}{6b_w} [2h_1 n_p^2 m_p^3 + h_2 n_p^2 (2m_p^3 + 3m_p^2 + m_p) + 2N^2 h_1 n_s^2 m_s^3 \\
&\quad + N^2 h_2 n_s^2 (2m_s^3 + 3m_s^2 + m_s) + 6n_p^2 m_p^2 h_\Delta]
\end{aligned}$$

rov. 4.18

Za předpokladu, že počet sekcí m a číslo vinutí n pro primární a sekundární stranu jsou stejná, pak tedy můžeme napsat $M=m_p=m_s$ a $n=n_p=n_s$ a tím pádem zjednodušit rov. 4.19 na rovnici znázorněnou níže.

$$L_k = \frac{\mu_0 l_w n^2}{3b_w} [2h_1 M^3 + h_2 (2M^3 + 3M^2 + M) + 3M^2 h_\Delta]$$

rov. 4.19

Rovnice popisující rozložení intenzity magnetického pole pro prokládanou strukturu je popsána níže. Odvozením rovnice pro prokládané struktury a následným porovnáním s rovnicí rov. 4.20 pro neprokládané struktury chceme zjistit poměr rozptylové indukčnosti mezi těmito způsoby rozložení struktur.

$$H(x) = \begin{cases} \frac{x - 2P(h_1 + h_2)}{h_1} H_p & 2P(h_1 + h_2) < x < 2P(h_1 + h_2) + h_1 \\ H_p & 2P(h_1 + h_2) + h_1 < x < (2P + 1)(h_1 + h_2) \\ 1 - \frac{x - (2P + 1)(h_1 + h_2)}{h_1} H_p & (2P + 1)(h_1 + h_2) < x < (2P + 1)(h_1 + h_2) + h_2 \\ 0 & (2P + 1)(h_1 + h_2) + h_1 < x < 2(P + 1)(h_1 + h_2) \end{cases}$$

rov. 4.20

Celková energie planárního transformátoru s proloženými strukturami je popsána rovnicí níže. Po dosazení této rovnice do rov. 4.13 a následné úpravě dostaneme rovnici úplné rozptylové indukčnosti rov. 4.22

$$W_i = \frac{\mu_0 b_w l_w}{2} \int_0^{M^2(h_1+h_2)} H(x)^2 dx = \frac{M \mu_0 b_w l_w}{2} \int_0^{2(h_1+h_2)} H(x)^2 dx = \frac{\mu_0 l_w I_p^2 n_p^2}{2b_w} \left(\frac{2h_1}{3} + h_2 \right)$$

rov. 4.21

$$L_{ki} = \frac{M\mu_0 l_w n_p^2}{b_w} \left(\frac{2h_1}{3} + h_2 \right)$$

rov. 4.22

Poměrem rozptylové indukčnosti neproložené struktury a rozptylové indukčnosti proložené struktury je vidět po následné úpravě z rov. 4.23, že proložená struktura má po zanedbání h_1 , h_2 a h_Δ přibližně $1/M^2$ menší rozptylovou indukčnost než neproložená struktura. Tímto jsme dokázali, že na uspořádání struktur záleží.

$$K = \frac{L_{ki}}{L_k} = \frac{2h_1 + 3h_2}{2h_1 M^2 + h_2(2M^2 + 3M + 1) + 3Mh_\Delta} \approx \frac{1}{M^2}$$

rov. 4.23

4.6 VLASTNOSTI PLANÁRNÍCH TRANSFORMÁTORŮ

Různé vlastnosti planárních transformátorů se odvíjejí od různých struktur (uspořádání primárního a sekundárního vinutí na desce plošného spoje). Tím se dostáváme k parazitní kapacitě a rozptylové indukčnosti, dvěma hlavními nežádoucími parazitními vlivům.

4.6.1 VÝHODY vs. NEVÝHODY

Planární transformátor, i když je mnohonásobně menší než tradiční vinutý transformátor si dokázal zachovat jeho přednosti. Jako jsou například velké výstupní proudy, nebo že dokáže přenášet velké frekvence. Planární transformátor má menší výšku vodivých cest (vinutí) než vinutý transformátor, proto je nižší rozptylová indukčnost a zároveň se tím vyvarujeme skin efektu. Tím se zajistilo zvýšení provozního kmitočtu a účinnost celého planárního transformátoru.

4.6.1.1 VÝHODY

- Malé rozměry
- Opakovatelnost
- Dobré tepelné vlastnosti
- Vyšší soudržnost
- Vysoký výstupní proud
- Téměř žádný skin efekt

4.6.1.2 NEVÝHODY

- Nízké výstupní napětí
- Vznik parazitních jevů

4.7 PROUŽITÍ V PRAXI

Planární transformátory jakožto nová technologie se praxi používají čím dál tím více tam, kde není dostatek místa pro běžné transformátory. Použití těchto transformátorů můžeme, dosáhnou velkého výkonu k celkovým rozměrům. Planární transformátory se převážně používají ve spínaných zdrojích, kde je třeba dosáhnou velké kmitočtové nezávislosti. [1][2][5]

5 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo teoreticky porozumět a pochopit princip planárních transformátorů od jejich vzniku až po použití v praxi. Jejich výroba, rozdělení a také pochopení jejich parazitních jevů, rozptylové indukčnosti a parazitní kapacity. Dále co předcházelo planárním transformátorům a proč se vlastně používají. V kapitole 2 jsme obecně popisovali co je to vlastně planární technologie a jaké součástky se touto technologií nechají vyrobit. Jako třeba planární kondenzátor, který se ale kvůli svým velkým rozměrům na desce plošného spoje téměř nepoužívá. Dále pak planární cívka a v neposlední řadě planární transformátor. V této kapitole jsme pochopili, že planární technologie i když je poměrně nová, je nedílnou součástí dnešní elektrotechniky. Další problematikou této práce bylo popsat historický vývoj desek plošného spoje od jednovrstvých desek až do dnes častěji používaných vícevrstvých desek plošného spoje. Důvodem méně častého používání jednovrstvých desek plošného spoje je, že tyto desky už nestačili potřebám dnešní elektrotechniky. Hlavní příčinou jsou rozměry u složitějších obvodů. A proto se začali vyrábět vícevrstvé desky plošného spoje, u kterých díky většímu počtu vrstev došlo ke zmenšení celkových rozměrů. Hlavní a největší kapitolu této bakalářské práce tvoří planární transformátor. Kde se zajímáme, z jakých materiálů se planární transformátory vyrábějí a jak se vyrábějí. V kapitole 4 se zabýváme základním rozdělením planárních transformátorů do tří skupin a to na spojování pomocí pinů, spojování přes prokovené otvory a integrováním přímo na desce plošné spoje. Každá tato skupina má svoje výhody a nevýhody. Dále se zabýváme uspořádáním struktur vinutí a jejich vliv na vlastnosti planárního transformátoru. Různé uspořádání struktur vinutí má vliv na parazitní jevy. Nejnižší parazitní jevy jsme zjistili, že má struktura s dvojitě proloženým sekundárním vinutím. Z toho vyplývá další zajímavá a dost podstatná část, která tvoří parazitní jevy a následné odvození výpočtu těchto parazitních jevů. Studií tohoto problému jsme zjistili, že rozptylová indukčnost a parazitní kapacita jdou proti sobě. To znamená, že snížením rozptylové indukčnosti zvýšíme parazitní kapacitu a naopak. A také nejdou úplně eliminovat. Proto se volí kompromis podle potřeby, zda je pro nás lepší mít větší rozptylovou kapacitu a menší parazitní indukčnost či naopak. V praxi se častěji volí větší parazitní kapacita a menší rozptylová indukčnost. Použití planárních transformátorů v praxi je čím dál tím častější a to hlavně ve spínacích zdrojích.

6 SEZNAM SYMBOLŮ

C	parazitní kapacita
S	plocha desek kondenzátoru
d	vzdálenost desek kondenzátoru
H	výška vodivé cesty
l_m	délka vnější cesty
l_w	délka vodivé cesty
W_d	šířka mezi cestami
W_c	šířka vodivé cesty
W_t	vzdálenost mezi vrstvami
ε	permitivita
μ	permeabilita
N	počet závitů cívky
b_w	šířka vinutí
h_1	výška vinutí
h_2	výška izolační vrstvy mezi jednotlivými vrstvami
h_Δ	výška izolační vrstvy mezi primární a sekundární stranou
P	počet primárního vinutí
H_p	magnetická intenzita primární strany
H_s	magnetická intenzita sekundární strany
I_p	proud primárního vinutí
I_s	proud sekundárního vinutí
n_p	číslo primárního vinutí
n_s	číslo sekundárního vinutí
m_p	počet sekcí primární strany
m_s	počet sekcí sekundární strany
W_p	energie primárního vinutí
W_s	energie sekundárního vinutí
W_Δ	energie izolace mezi primární a sekundární stranou
L_p	rozptylová indukčnost primárního vinutí
L_s	rozptylová indukčnost sekundárního vinutí
L_k	celková rozptylová indukčnost
K	poměr

7 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 planární cívka	10
Obr. 2.2 planární kondenzátor.....	11
Obr. 2.3 rozložený planární transformátor.....	12
Obr. 4.1 struktura planárního transformátoru	16
Obr. 4.2 desky TR spojené pomocí pinů	18
Obr. 4.3 vrstvy TR spojené pomocí prokovených otvorů	19
Obr. 4.4 TR integrovaný přímo na DPS	20
Obr. 4.5 Náhradní schéma planárního transformátoru.....	20
Obr. 4.6 neprokládané struktury	22
Obr. 4.7 Polo-prokládané struktury.....	22
Obr. 4.8 Prokládané struktury	23
Obr. 4.9 Dvojitě prokládané sekundární vinutí.....	24
Obr. 4.10 indukčnosti jednotlivých sekcí DPS.....	27
Obr. 4.11 ekvivalentní obvod parazitních kapacit	27

8 SEZNAM ROVNIC

rov. 4.1 kapacita primárního a sekundárního vinutí.....	28
rov. 4.2 základní rovnice pro výpočet kapacity	28
rov. 4.3 rovnice pro výpočet kapacity C1.....	28
rov. 4.4 rovnice pro výpočet kapacity C1.....	28
rov. 4.5 kapacita izolace mezi primárním a sekundárním vinutím.....	29
rov. 4.6 únik indukčnosti	29
rov. 4.7 intenzita magnetického pole primární strany	29
rov. 4.8 intenzita magnetického pole v jedné vrstvě primární strany	29
rov. 4.9 intenzita magnetického pole v jedné vrstvě sekundární strany	30
rov. 4.10 celková intenzita magnetického pole.....	30
rov. 4.11 energie magnetického pole.....	30
rov. 4.12 energie magnetického pole primární strany	30
rov. 4.13 energie indukčnost	30
rov. 4.14 rozptylová indukčnost primární strany.....	31
rov. 4.15 energie magnetického pole sekundární strany	31
rov. 4.16 rozptylová indukčnost sekundární strany	31
rov. 4.17 energie v izolaci mezi primární a sekundární stranou	31
rov. 4.18 celková rozptylová indukčnost neproložených struktur	32
rov. 4.19 zjednodušená celková rozptylová indukčnost neproložených struktur	32
rov. 4.20 intenzita magnetického pole proložené strukry	32
rov. 4.21 celková energie magnetického pole proložené struktury	32
rov. 4.22 celková rozptylová indukčnost proložené struktury	33
rov. 4.23 poměr rozptylových indukčnosti neproložené a proložené struktury	33

9 POUŽITÉ OBRÁZKY

Obr. 2.1 AUTOR NEUVEDEN. *silvaco.com* [online]. [cit. 5.4.2014]. Dostupný na WWW: http://www.silvaco.com/services/parasiticExtractionServices/par_extrct3.gif

Obr. 2.2 AUTOR NEUVEDEN. *emeraldinsight.com* [online]. [cit. 5.4.2014]. Dostupný na WWW: http://www.emeraldinsight.com/content_images/fig/2180260208002.png

Obr. 2.3 AUTOR NEUVEDEN. *www.planars.com* [online]. [cit. 5.4.2014]. Dostupný na WWW: <http://www.planars.com/home.html>

Obr. 4.1 AUTOR NEUVEDEN. *freepatentsonline.com* [online]. [cit. 5.4.2014]. Dostupný na WWW: https://www.google.cz/search?q=6664883-0-large&rlz=1C1KTSY_enCZ556CZ556&espv=210&es_sm=122&source=lnms&tbn=isc&sa=X&ei=7UJAU_HpGcSStAab3YBY&ved=0CAgQ_AUoAQ&biw=1366&bih=624#facrc=_&imgdii=_&imgrc=KmvqJWbz1gdXuM%253A%3BC6t4EJouhLxsKM%3Bhttp%253A%252F%252Fwww.freepatentsonline.com%252F6831544-0-large.jpg%3Bhttp%253A%252F%252Fwww.freepatentsonline.com%252F6831544.html%3B2113%3B2581

Obr. 4.2 AUTOR NEUVEDEN. *mpsind.com* [online]. [cit. 5.4.2014]. Dostupný na WWW: http://www.mpsind.com/MPS-pdf-datasheets/planar_transformers/PP25F_Data_Sheet.pdf

Obr. 4.3 AUTOR NEUVEDEN. *directindustry.com* [online]. [cit. 5.4.2014]. Dostupný na WWW: <http://www.directindustry.com/prod/etal/planar-power-transformers-electronics-15905-1239757.html>

Obr. 4.4 AUTOR NEUVEDEN. *somacis.com* [online]. [cit. 5.4.2014]. Dostupný na WWW: http://www.somacis.com/uploads/images_prodotti/foto_31.jpg

Obr. 4.5 Vlastní tvorba

Obr. 4.6 JUNLIANG QIN; ZHONG YU; KE SUN a kol. *ieee.com* [online]. [cit. 5.4.2014]. Dostupný na WWW:
<http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/xpls/icp.jsp?arnumber=6414111>

Obr. 4.7 JUNLIANG QIN; ZHONG YU; KE SUN a kol. *ieee.com* [online]. [cit. 5.4.2014]. Dostupný na WWW:
<http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/xpls/icp.jsp?arnumber=6414111>

Obr. 4.8 JUNLIANG QIN; ZHONG YU; KE SUN a kol. *ieee.com* [online]. [cit. 5.4.2014]. Dostupný na WWW:
<http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/xpls/icp.jsp?arnumber=6414111>

Obr. 4.9 JUNLIANG QIN; ZHONG YU; KE SUN a kol. *ieee.com* [online]. [cit. 5.4.2014]. Dostupný na WWW:
<http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/xpls/icp.jsp?arnumber=6414111>

Obr. 4.10 LI, Jianbing; SHI, Yujie; NIU, Zhongxia; ZHOU, Dongfang, *ieee.com* [online]. [cit. 17.4.2014]. Dostupný na WWW:
<http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1575053>

Obr. 4.11 LI, Jianbing; SHI, Yujie; NIU, Zhongxia; ZHOU, Dongfang, *ieee.com* [online]. [cit. 17.4.2014]. Dostupný na WWW:
<http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1575053>

10 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] FAKTOR Z. Transformátory a cívky. BEN, Praha 2002
- [2] FAKTOR Z. Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. BEN, Praha 2002
- [3] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů – principy a pravidla praktického návrhu.* BEN-Technická literatura, 2010.
- [4] ŠANDERA, JOSEF. *Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž – SMT a SMD.* BEN-Technická literatura, 2010
- [5] TKOTZ, Klaus. *Příručka pro elektrotechnika. Vyd. 1. Praha: Europa-Sobotáles, 2002, 561 s. ISBN 80-86706-00-1*
- [6] FLORIÁN, Petr. *3-D CÍVKY A TRANSFORMÁTORY [online].* Brno, 2008 [cit. 2014-03-29]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/1247/Bakal%C3%A1%C5%99sk%C3%A1%20pr%C3%A1ce.pdf?sequence=1>. *Bakalářská práce. Vysoké učení v Brně.*
- [7] *Plošný spoj.* In: *Plošný spoj [online].* 2011 [cit. 2014-03-29]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Plo%C5%A1n%C3%BD_spoj
- [8] QIN, Junliang, Zhong YU, Ke SUN, Peiwei WEI a Zhongwen LAN. *Analysis and Simulation of Parasitic Parameters for PCB Planar Transformer.* 2012 International Conference on Control Engineering and Communication Technology [online]. IEEE, 2012 [cit. 2014-03-29]. DOI: 10.1109/ICCECT.2012.202. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6414111>
- [9] LI, Jianbing, Changchao HU a Xuemin PANG. *Analysis of the leakage inductance of planar transformer.* 2009 9th International Conference on Electronic Measurement [online]. IEEE, 2009, s. 1-273-1-276 [cit. 2014-04-16]. DOI: 10.1109/ICEMI.2009.5274877. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5274877>

- [10] ACKERMANN, B., A. LEWALTER a E. WAFTENSCHMIDT. *Analytical modelling of winding capacitances and dielectric losses for planar transformers. 2004 IEEE Workshop on Computers in Power Electronics, 2004. Proceedings [online]. IEEE, 2004, s. 2-9 [cit. 2014-04-05]. DOI: 10.1109/CIPE.2004.1428111. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1428111>*
- [11] JIANBING LI, YUJIE SHI, ZHONGXIA NIU a DONGFANG ZHOU. Modeling, simulation and optimization design of PCB planar transformer. 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems [online]. IEEE, 2005, 1736-1739 Vol. 3 [cit. 2014-04-17]. DOI: 10.1109/ICEMS.2005.202856. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1575053>